تأثیر گیاهان پوششی کود سبز تابستانه بر افزایش کربن آلی خاک، حاصلخیزی خاک و بهره‌وری گندم در سامانه زراعی گندم بنیان آبی

محمدرضا مهرور[1]، علی قربانی[2]

[1]عضو هیئت علمی بازنشسته، [2]پژوهشگر غلات، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (SPII)، کرج، ایران

نویسنده مسئول: mehrvarmr@gmail.com

چکیده

کاهش ماده آلی خاک و وابستگی فزاینده به کودهای شیمیایی، پایداری بلندمدت تولید گندم آبی در مناطق نیمه‌خشک را تهدید می‌کند. کودهای سبز پوششی تابستانه (SGMCCs) به‌عنوان یک راهبرد امیدبخش در کشاورزی حفاظتی برای بازسازی سلامت خاک، افزایش ترسیب کربن و بهبود بهره‌وری محصول مطرح شده‌اند. این مطالعه اثرات بلندمدت کودهای سبز پوششی تابستانه را بر عملکرد دانه گندم، کربن آلی خاک (SOC)، ماده آلی خاک (SOM)، نیتروژن کل خاک (TN) و حاصلخیزی کلی خاک در یک سامانه کشت گندم آبی بررسی کرد. یک آزمایش مزرعه‌ای چهار ساله در شرایط نیمه‌خشک در کرج، ایران انجام شد. شانزده گونه پوششی تابستانه پس از یک دوره کوتاه آیش علفی ایجاد شده و 2 تا 3 هفته قبل از کاشت گندم به خاک برگردانده شدند. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عملکرد دانه گندم، تولید زیست‌توده، شاخص برداشت، کربن آلی خاک، ماده آلی خاک، نیتروژن کل و نسبت C:N به‌صورت سالانه اندازه‌گیری شدند. داده‌ها با استفاده از تحلیل واریانس تجزیه شدند و مقایسه میانگین تیمارها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن یا LSD در سطح احتمال $P \leq 0.05$ انجام گرفت. پس از سه سال اجرای متوالی، کربن آلی خاک حدود 80 درصد افزایش یافت، ماده آلی خاک 80 درصد افزایش نشان داد و نیتروژن کل خاک 111 درصد افزایش پیدا کرد. عملکرد دانه گندم در سال دوم نسبت به سال اول 35 درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده اثر باقیمانده قوی کودهای سبز پوششی تابستانه است. در میان گونه‌های ارزیابی‌شده، ماش (Vigna radiata)، لوبیای چشم‌بلبلی (Vigna unguiculata) و ماشک گل خوشه ای (Vicia villosa) به‌طور مداوم بیشترین بهبود را در حاصلخیزی خاک و بهره‌وری گندم ایجاد کردند. ادغام کودهای سبز پوششی تابستانه با خاک‌ورزی حداقلی به‌طور قابل توجهی حاصلخیزی خاک را بهبود داد، ترسیب کربن را افزایش داد و بهره‌وری گندم را در شرایط آبی و نیمه‌خشک افزایش داد. اثرات تجمعی مشاهده‌شده در طول چند فصل زراعی نشان می‌دهد که این راهبرد مدیریتی یک مسیر عملی برای تولید پایدار گندم فراهم می‌کند، در حالی که وابستگی به کودهای مصنوعی را کاهش داده و سلامت بلندمدت خاک را بهبود می‌بخشد.

کلیدواژه‌ها: کشاورزی حفاظتی؛ گیاهان پوششی؛ کود سبز؛ گندم آبی؛ حاصلخیزی خاک؛ کربن آلی خاک؛ سامانه‌های کشت پایدار

1. مقدمه

تداوم تولید گندم (Triticum aestivum L.) همراه با حفظ سلامت خاک، یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی نوین به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک به شمار می‌رود؛ مناطقی که در آن‌ها

کشت فشرده، خاک‌ورزی مرسوم و وابستگی شدید به کودهای معدنی موجب تسریع روند تخریب خاک شده است. کاهش کربن آلی خاک (SOC)، افت ماده آلی خاک (SOM)، کاهش فعالیت‌های زیستی و تخریب ویژگی‌های فیزیکی خاک، همگی پایداری بلندمدت تولید کشاورزی و پایداری محیط‌زیست را تهدید می‌کنند. امروزه تخریب خاک بخش قابل توجهی از اراضی کشاورزی جهان را تحت تأثیر قرار داده و ضمن کاهش عملکرد محصولات، ظرفیت خاک را برای ارائه خدمات سامانه اکولوژیکی ضروری مانند چرخه مواد غذایی، تنظیم آب، حفظ تنوع زیستی و ترسیب کربن کاهش داده است (FAO, 2021, 2023; IPCC, 2022; Lal, 2015, 2020).

در میان شاخص‌های مختلف کیفیت خاک، کربن آلی خاک به‌عنوان یکی از حساس‌ترین و جامع‌ترین شاخص‌های سلامت خاک شناخته می‌شود، زیرا بر پایداری خاکدانه‌ها، ظرفیت نگهداری آب، قابلیت دسترسی عناصر غذایی، فعالیت میکروبی و مقاومت در برابر تنش‌های محیطی اثر مستقیم دارد. به همین دلیل، افزایش SOC به یکی از اهداف اصلی کشاورزی حفاظتی تبدیل شده است؛ نه تنها برای بهبود عملکرد محصولات، بلکه برای کاهش تغییرات اقلیمی از طریق ترسیب بلندمدت کربن (Lal, 2015; Lal et al., 2020). در نتیجه، راهکارهای مدیریتی که بتوانند کربن آلی خاک را احیا کرده و همزمان تولید اقتصادی را حفظ کنند، توجه فزاینده‌ای در پژوهش‌های جهانی یافته‌اند.

گیاهان پوششی (Cover crops) یکی از اجزای اصلی کشاورزی حفاظتی محسوب می‌شوند و به‌طور گسترده به‌عنوان راهبردی مؤثر برای بهبود کیفیت خاک و ارتقای خدمات سامانه اکولوژیکی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اثرات آن‌ها تنها به کنترل فرسایش محدود نمی‌شود، بلکه شامل افزایش ورودی مواد آلی، بهبود چرخه عناصر غذایی، افزایش فعالیت زیستی خاک، بهبود نفوذپذیری آب، کنترل علف‌های هرز و کاهش تلفات مواد غذایی از طریق آبشویی نیز می‌شود (Blanco-Canqui et al., 2015; Poeplau & Don, 2015; Abdalla et al., 2019). همچنین مطالعات متعدد نشان داده‌اند که گیاهان پوششی با افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و حفظ عملکرد محصول در شرایط تنش خشکی، موجب افزایش تاب‌آوری سامانه‌های کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی می‌شوند (Basche et al., 2016; Chahal et al., 2020).

پیشرفت‌های اخیر در بوم‌شناسی خاک نشان داده است که مزایای گیاهان پوششی فراتر از بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. تنوع گیاهان پوششی موجب افزایش تنوع میکروبی، تقویت فرآیندهای تبدیل عناصر غذایی و بهبود تعاملات زیستی در ناحیه ریزوسفر می‌شود. این بهبودهای زیستی اغلب اثرات پایدار (legacy effects) ایجاد می‌کنند که پس از پایان دوره گیاه پوششی باقی مانده و بر رشد و عملکرد محصول بعدی تأثیر مثبت می‌گذارند (Bowles et al., 2020; Oldfield et al., 2022). علاوه بر این، گیاهان پوششی لگومینه با تثبیت زیستی نیتروژن، وابستگی به کودهای شیمیایی نیتروژنه را کاهش داده و همزمان بهره‌وری مصرف عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک را افزایش می‌دهند (Finney & Kaye, 2017).

با وجود حجم قابل توجهی از مطالعات در زمینه گیاهان پوششی، همچنان شکاف‌های مهمی در دانش موجود وجود دارد. بیشتر پژوهش‌های پیشین بر گیاهان پوششی زمستانه در اقلیم‌های مرطوب یا معتدل متمرکز بوده‌اند، در حالی که اطلاعات محدودی درباره کودهای سبز پوششی تابستانه که در دوره آیش بین برداشت گندم و کشت بعدی در شرایط آبی و نیمه‌خشک استفاده می‌شوند وجود دارد. همچنین، تعداد کمی از مطالعات بلندمدت اثرات همزمان تغییرات SOC، SOM، نیتروژن کل خاک و عملکرد گندم را پس از کاربرد مکرر این نوع کودهای سبز بررسی

کرده‌اند. این کمبود اطلاعات به‌ویژه در سامانه‌های کشت گندم آبی ایران که خاک‌ها معمولاً دارای ماده آلی پایین و حاصلخیزی رو به کاهش هستند، بیشتر مشهود است.

در ایران، تولید پایدار گندم به‌طور فزاینده‌ای با محدودیت‌هایی مانند پایین بودن SOC، کمبود ورودی مواد آلی و وابستگی طولانی‌مدت به کودهای معدنی مواجه است. اگرچه مطالعات پیشین اهمیت کشاورزی حفاظتی شامل کم خاک‌ورزی، حفظ بقایای گیاهی و تنوع کشت را در بهبود حاصلخیزی خاک و بهره‌وری آب در شرایط نیمه‌خشک نشان داده‌اند، اما پژوهش‌های مربوط به نقش بلندمدت کودهای سبز پوششی تابستانه در بازسازی خاک و افزایش عملکرد گندم همچنان محدود است. بنابراین، شناسایی گونه‌های مناسب گیاهان پوششی تابستانه که توانایی تولید زیست‌توده بالا، بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش عملکرد گندم را داشته باشند، برای توسعه سامانه‌های تولید پایدار و مقاوم ضروری است.

مطالعه حاضر با اجرای یک آزمایش مزرعه‌ای چهار ساله در شرایط آبی و نیمه‌خشک کرج، ایران، این شکاف پژوهشی را هدف قرار داده است. در این تحقیق 16 گونه کود سبز پوششی تابستانه از خانواده‌های گیاهی مختلف از نظر توانایی بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش بهره‌وری گندم ارزیابی شدند. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر ویژگی‌های منفرد خاک یا پاسخ‌های کوتاه‌مدت تمرکز داشتند، در این پژوهش تغییرات تجمعی SOC، SOM، نیتروژن کل خاک و عملکرد دانه گندم به‌صورت همزمان بررسی شد تا اثرات پایدار و بلندمدت این راهبرد مدیریتی مشخص گردد.

فرضیه این مطالعه آن بود که کاربرد مداوم کودهای سبز پوششی تابستانه موجب افزایش تدریجی کربن آلی خاک، بهبود دسترسی نیتروژن، ارتقای حاصلخیزی کلی خاک و افزایش تجمعی عملکرد گندم از طریق اثرات مثبت باقیمانده بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک خواهد شد.

بر این اساس، اهداف این پژوهش عبارت بودند از: (i) ارزیابی عملکرد 16 گونه کود سبز پوششی تابستانه در سامانه کشت آبی گندم؛ (ii) کمی‌سازی تغییرات بلندمدت کربن آلی خاک، ماده آلی خاک و نیتروژن کل خاک؛ (iii) تعیین اثر این تغییرات بر عملکرد دانه گندم؛ و (iv) شناسایی مناسب‌ترین گونه‌های پوششی تابستانه برای بهبود پایداری تولید گندم آبی در شرایط نیمه‌خشک.

2. مرور منابع

تخریب خاک، به‌ویژه کاهش کربن آلی خاک (SOC) و ماده آلی خاک (SOM)، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های تولید پایدار کشاورزی در سطح جهان شناخته شده است. کاهش ماده آلی خاک اثرات منفی قابل توجهی بر ساختار خاک، ظرفیت نگهداری آب، چرخه عناصر غذایی و فعالیت زیستی دارد و در نهایت موجب کاهش عملکرد محصولات و افزایش آسیب‌پذیری سامانه های اکولوژیکی کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی می‌شود. Lal (2015, 2020) تأکید می‌کند که احیای ماده آلی خاک برای بهبود سلامت خاک، افزایش نگهداری آب و تقویت تاب‌آوری اکوسامانه‌ها، به‌ویژه در شرایط افزایش تنش‌های اقلیمی، بنیادی و ضروری است.

ارزیابی‌های جهانی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2021, 2023) و هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC, 2022) نیز تخریب خاک و کاهش SOC را به‌عنوان تهدیدی جدی

برای امنیت غذایی و پایداری محیط‌زیست معرفی کرده‌اند. این گزارش‌ها بر اهمیت راهبردهای مدیریت پایدار اراضی، از جمله کشاورزی حفاظتی، به‌عنوان ابزارهای کلیدی برای کاهش تخریب زمین و افزایش ترسیب کربن خاک تأکید دارند.

در میان روش‌های کشاورزی حفاظتی، گیاهان پوششی و سامانه‌های کود سبز به دلیل نقش چندمنظوره در سامانه های اکولوژیکی زراعی توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. شواهد فراتحلیلی نشان می‌دهد که گیاهان پوششی می‌توانند به‌طور معنی‌داری ترسیب کربن آلی خاک را افزایش دهند، ساختار خاک را بهبود بخشند، فرسایش را کاهش دهند و چرخه عناصر غذایی را تقویت کنند (Poeplau & Don, 2015; Blanco-Canqui et al., 2015). علاوه بر این، Basche et al. (2016) گزارش کردند که گیاهان پوششی با بهبود نفوذ آب، کاهش تبخیر و افزایش ذخیره رطوبت خاک، موجب افزایش تاب‌آوری محصولات در برابر تنش خشکی می‌شوند.

فراتر از بهبودهای فیزیکی و شیمیایی خاک، مطالعات اخیر بر اهمیت فرآیندهای زیستی خاک تأکید کرده‌اند. گیاهان پوششی موجب افزایش زیست‌توده میکروبی، تنوع و فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌شوند و از این طریق کارکرد چندگانه اکوسامانه و کارایی چرخه عناصر غذایی را بهبود می‌بخشند (Bowles et al., 2020; Oldfield et al., 2022). همچنین Finney و Kaye (2017) نشان دادند که تنوع کارکردی در مخلوط‌های گیاهان پوششی می‌تواند همزمان چندین فرآیند سامانه اکولوژیکی را بهبود داده و عملکرد کلی سامانه را افزایش دهد.

گیاهان پوششی لگومینه به دلیل توانایی تثبیت نیتروژن اتمسفری اهمیت ویژه‌ای دارند و می‌توانند وابستگی به کودهای شیمیایی نیتروژنه را کاهش دهند. مطالعات نشان داده‌اند که سامانه‌های مبتنی بر لگوم‌ها می‌توانند نقش مهمی در افزایش دسترسی نیتروژن خاک و بهبود عملکرد محصولات غلات داشته باشند (Drinkwater et al., as cited in relevant literature; Finney & Kaye, 2017). در مقابل، گونه‌های غیرلگوم مانند گراس‌ها عمدتاً از طریق تولید زیست‌توده و افزایش ورودی کربن عمل می‌کنند، هرچند اثر آن‌ها بر دسترسی سریع نیتروژن معمولاً کمتر است.

تنوع گونه‌ای گیاهان پوششی نیز به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در عملکرد سامانه شناخته شده است. Chapagain et al. (2020) و Chu et al. (2017) گزارش کردند که مخلوط‌های چندگونه‌ای می‌توانند خدمات سامانه اکولوژیکی مانند چرخه عناصر غذایی، حفظ رطوبت خاک و کنترل علف‌های هرز را تقویت کنند. با این حال، شدت این اثرات به ترکیب گونه‌ای، شرایط محیطی و نحوه مدیریت بستگی دارد.

کنترل علف‌های هرز نیز یکی دیگر از کارکردهای مهم گیاهان پوششی است. Mohler (2001) و Khan et al. (2019) نشان دادند که گیاهان پوششی از طریق رقابت بر سر منابع و ایجاد پوشش فیزیکی، جوانه‌زنی و استقرار علف‌های هرز را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، برخی گونه‌ها ممکن است اثرات آللوپاتیک داشته باشند که به کاهش بیشتر فشار علف‌های هرز و بهبود استقرار محصول کمک می‌کند.

در سامانه‌های کشت گندم آبی، گیاهان پوششی می‌توانند از طریق مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم موجب افزایش پایداری عملکرد شوند. این مکانیسم‌ها شامل بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش دسترسی نیتروژن، بهبود ساختار خاک و افزایش بهره‌وری مصرف آب است (Bhattacharyya et al., 2008; Alonso-Ayuso et al., 2013). مطالعات بلندمدت نیز نشان داده‌اند

که ادغـام گیاهـان پوششـی در تناوب‌هـای زراعی می‌توانـد بـه بهبـود پایـدار کیفیت خـاک و ثبـات عملکرد محصول منجر شود.

در ایران و سایر منـاطق نیمه‌خشـک، کـاهش مـاده آلی خـاک به‌ویـژه شـدید اسـت و بسـیاری از خاک‌هـای زراعی دارای کمـتر از 1 درصـد مـاده آلی هسـتند (Malakouti, 2018). پژوهش‌هـای انجام‌شـده در سـازمان تحقیقـات، آمـوزش و تـرویج کشـاورزی (AREEO) نشـان داده‌انـد کـه روش‌های حفاظتی مانند کم خاک‌ورزی، حفظ بقایـای گیـاهی و تنـوع در تنـاوب زراعی می‌تواننـد به‌تدریج موجب افزایش SOC و بهبود بهره‌وری مصرف آب شوند. بـا این حـال، بیشـتر مطالعـات موجود بر گیاهان پوششی زمستانه یا مدیریت بقایا تمرکز داشته‌اند و اطلاعات محـدودی دربـاره سامانه‌های کود سبز تابستانه در تناوب‌های گندم آبی وجود دارد.

در مجموع، منابع علمی نشان می‌دهند که گیاهان پوششی یک راهبرد کلیدی برای بهبـود سـلامت خاک، افزایش ترسیب کربن و ارتقای پایداری سامانه‌های مبتـنی بـر غلات هسـتند. بـا این وجـود، کارایی این سامانه‌ها به‌شدت وابسته به شرایط اقلیمی، انتخاب گونه‌ها و سطح مـدیریت اسـت. به‌ویژه، کمبود قابل توجهی در مطالعات بلندمدت مربوط به کودهای سـبز پوششـی تابسـتانه در شرایط آبی و نیمه‌خشک وجود دارد. مطالعه حاضر با هدف پر کردن این شکاف، اثرات همزمـان کشت پوششی تابستانه، پویایی حاصلخیزی خاک و بهره‌وری گنـدم را در یـک آزمـایش مـزرعه‌ای چندساله بررسی نمود.

3. مواد و روش‌ها

3.1 محل اجرای پژوهش

یک آزمایش مزرعه‌ای چهار ساله (سال‌های زراعی 1399-1396) در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (SPII) وابسته بـه سـازمان تحقیقـات، آمـوزش و تـرویج کشـاورزی (AREEO) در کرج، ایران انجام شد. منطقه آزمایشی در ناحیه‌ای نیمه‌خشک با اقلیم مدیترانه‌ای قـرار دارد کـه میانگین بارندگی سالانه آن کمتر از 300 میلی‌متر و میانگین دمـای سـالانه هـوا حـدود 15 تـا 17 درجه سانتی‌گراد است. خاک محل آزمایش بر اساس طبقه‌بندی بافت خاک USDA در گروه لــوم رسی (Clay loam) قرار داشت.

3.2 طرح آزمایش و تیمارها

این آزمایش به‌صورت یک مطالعه بلندمدت در قالب طرح بلوک‌هـای کامـل تصـادفی (RCBD) بـا سه تکرار اجرا شد. شانزده گونه کود سبز پوششی تابستانه به‌عنوان تیمارهـای آزمایشـی مـورد ارزیابی قرار گرفتند. گونه‌هـای مـورد بررسـی شـامل سـورگوم دانه‌ای (Sorghum bicolor L.)، ارزن علوفه‌ای (Pennisetum glaucum L.)، هیبرید سورگوم–سودان‌گراس (Sorghum bicolor × Sorghum sudanense)، جو (Hordeum vulgare L.)، گلرنگ (Carthamus tinctorius L.)، ماش (Vigna radiata L.)، کلزا (Brassica napus L.)، سویا (Glycine max L.)، لوبیای چشم‌بلبلی (Vigna unguiculata L.)، شــبدر ایــرانی (Trifolium resupinatum L.)، شــبدر برســیم (Trifolium alexandrinum L.)، چاودار (Secale cereale L.)، ماشک گـل خوشـه ای (Vicia villosa Roth)، یولاف یا جو دوسر (Avena sativa L.)، کنجد (Sesamum indicum L.) و اسـپرس (Onobrychis viciifolia Scop.) بودند.

هر تیمار در طول دوره مطالعه در کرت‌های ثابت کشت شد تا اثرات تجمعی و باقی‌مانده ناشی از کاربرد مکرر کود سبز تابستانه بر کیفیت خاک و عملکرد گندم قابل ارزیابی باشد.

3.3 مدیریت زراعی

پس از برداشت گندم در هر سال، یک دوره آیش کوتاه علف هرز مدیریت‌شده حدود 45 روزه در اوایل تابستان اعمال شد. گیاهان پوششی تابستانه در نیمه مرداد ماه هرسال زراعی کشت شده و به مدت حدود 60 تا 65 روز رشد کردند.

پیش از کاشت گندم، زیست‌توده هوایی گیاهان پوششی با استفاده از هرس بشقابی سبک (Light disk harrow) حدود 2 تا 3 هفته قبل از کاشت به خاک برگردانده شد. گندم پاییزه در هفته اول نوامبر هر سال با استفاده از روش‌های استاندارد زراعی توصیه‌شده برای تولید گندم آبی در منطقه کشت شد.

کلیه عملیات مدیریتی شامل برنامه آبیاری، کنترل علف‌های هرز و مدیریت آفات به‌صورت یکنواخت در تمامی تیمارها اجرا گردید.

3.4 نمونه‌برداری خاک و آنالیزهای آزمایشگاهی

نمونه‌های مرکب خاک پیش از آغاز آزمایش و پس از هر فصل زراعی برای بررسی تغییرات زمانی در حاصلخیزی خاک جمع‌آوری شدند. این نمونه‌ها برای تعیین کربن آلی خاک (SOC)، ماده آلی خاک (SOM)، نیتروژن کل خاک (TN) و نسبت کربن به نیتروژن (C:N) با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی مورد تجزیه قرار گرفتند.

این شاخص‌ها به این دلیل انتخاب شدند که اجزای کلیدی کیفیت خاک را تشکیل می‌دهند و نسبت به تغییرات ناشی از مدیریت‌های حفاظتی بلندمدت حساس هستند.

3.5 اندازه‌گیری‌های زراعی

در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی، گندم از هر کرت برداشت شد تا عملکرد دانه تعیین گردد.

متغیرهای اندازه‌گیری‌شده شامل موارد زیر بود:

- عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
- کل زیست‌توده هوایی
- شاخص برداشت

همچنین زیست‌توده تولیدی هر گیاه پوششی تابستانه پیش از اختلاط با خاک اندازه‌گیری شد تا تولید کود سبز ارزیابی گردد.

3.6 تحلیل آماری

داده‌ها با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) متناسب با طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با نرم‌افزار آماری SAS (SAS Institute, Cary, NC, USA) تحلیل شدند. اثر تیمارها در سطح احتمال $P \leq 0.05$ معنی‌دار تلقی شد.

در صورت وجود اختلاف معنی‌دار، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن (Duncan’s Multiple Range Test) یا آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال 5 درصد انجام شد.

3.7چارچوب پژوهش

سامانه آزمایشی شامل چرخه مدیریتی سالانه زیر بود:

1.برداشت گندم آبی 2. دوره آیش مدیریت‌شده 45 روزه در تابستان 3. کشت 16 گونه کود سبز پوششی تابستانه 4. رشد گیاهان به مدت حدود 60 تا 65 روز 5. اختلاط مکانیکی زیست‌توده با خاک 6. کاشت گندم حدود 2 تا 3 هفته پس از اختلاط 7. ارزیابی شاخص‌های عملکرد محصول و حاصلخیزی خاک 8. تکرار این چرخه برای چهار فصل زراعی متوالی به‌منظور کمی‌سازی اثرات تجمعی و باقی‌مانده بلندمدت

4. نتایج و بحث

تولید زیست‌توده گیاهان پوششی

نتایج نشان داد که میان گونه‌های مختلف کود سبز پوشش‌دهنده تابستانه از نظر تولید زیست‌توده تفاوت‌های قابل توجهی وجود دارد. سورگوم–سودان‌گراس بالاترین میزان زیست‌توده خشک را در میان تمامی گونه‌های مورد بررسی تولید کرد و پس از آن ارزن علوفه‌ای، ماش (Vigna radiata) و گلرنگ قرار گرفتند. این نتایج نشان‌دهنده ظرفیت بالای تولید زیست‌توده در گیاهان گرمسیری C4 تحت شرایط آبی تابستانه است.

از نظر تولید زیست‌توده تازه، ماشک گل خوشه ای (Vicia villosa) در رتبه نخست قرار گرفت که بیانگر رشد سریع اولیه و توسعه مناسب تاج‌پوشش این گونه در شرایط آزمایشی بود.

عملکرد دانه گندم پس از گیاهان پوششی

عملکرد دانه گندم به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر گونه گیاه پوششی قبلی قرار گرفت. بیشترین عملکرد گندم پس از ماش (Vigna radiata) مشاهده شد که نشان‌دهنده اثر مثبت قوی این گیاه لگومینه بر عملکرد گندم است. سایر تیمارهای برتر شامل چاودار (Secale cereale)، شبدر شیرین (Melilotus officinalis) و کنجد (Sesamum indicum) بودند که نسبت به سایر تیمارها موجب بهبود عملکرد گندم شدند.

به‌طور کلی، گیاهان پوششی لگومینه در مقایسه با گونه‌های غیرلگوم اثرات بهتری بر افزایش عملکرد گندم داشتند که احتمالاً ناشی از افزایش دسترسی نیتروژن و بهبود فعالیت زیستی خاک است.

تغییرات کربن آلی خاک و شاخص‌های حاصلخیزی

در طول دوره سه‌ساله آزمایش، بهبود قابل توجهی در شاخص‌های حاصلخیزی خاک مشاهده شد (جدول 3). کربن آلی خاک (SOC) از 0.45 درصد به 0.81 درصد افزایش یافت که معادل 80 درصد افزایش است. ماده آلی خاک (SOM) نیز از 0.78 درصد به 1.40 درصد رسید که نشان‌دهنده افزایش 80 درصدی است. نیتروژن کل خاک از 0.040 درصد به 0.0844 درصد افزایش یافت که معادل 111 درصد رشد می‌باشد. در مقابل، نسبت کربن به نیتروژن (C:N) از

11.25 به 9.60 کاهش یافت (14.69 درصد کاهش)، که بیانگر بهبود چرخه عناصر غذایی و افزایش سرعت تجزیه مواد آلی در خاک است.

اثرات تجمعی بر عملکرد گندم

اثر مثبت و تجمعی سامانه کود سبز پوشش‌دهنده تابستانه بر عملکرد گندم به‌وضوح مشاهده شد. عملکرد دانه گندم در سال دوم نسبت به سال اول 35 درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده بهبود تدریجی شرایط خاک در طول زمان است.

در مقایسه با شاخص‌های عملکرد منطقه‌ای (جدول 4)، عملکرد گندم در سامانه گیاه پوششی به‌طور قابل توجهی بالاتر از میانگین عملکرد گندم آبی استان البرز (5068 کیلوگرم در هکتار) بود و همچنین از عملکرد گزارش‌شده در مطالعات قبلی برای رقم «بهاران» تحت مدیریت متداول (6352 کیلوگرم در هکتار) فراتر رفت. در شرایط بهینه استفاده از کود سبز تابستانه، عملکرد گندم تا 8130 کیلوگرم در هکتار افزایش یافت که نشان‌دهنده ظرفیت بالای این سامانه برای ارتقای تولید گندم در شرایط نیمه‌خشک آبی است.

زیست‌توده گیاهان پوششی

جدول 1 نشان داد که سورگوم–سودان‌گراس بیشترین زیست‌توده خشک را تولید کرده است.

جدول 1. رتبه‌بندی گیاهان پوششی بر اساس تولید زیست‌توده خشک

رتبه	گونه
1	سورگوم–سودان‌گراس
2	ارزن علوفه‌ای
3	ماش
4	گلرنگ

در خصوص زیست‌توده تازه، شبدر برسیم (Crown vetch) در رتبه نخست قرار گرفت.

عملکرد دانه گندم

بیشترین عملکرد دانه گندم پس از کود سبز ماش مشاهده شد.

جدول 2. عملکرد نسبی گندم پس از گیاهان پوششی

رتبه	گونه
1	ماش
2	چاودار

گونه	رتبه
اسپرس	3
کنجد	4

تغییرات کربن آلی خاک

جدول 3. تغییرات شاخص‌های حاصلخیزی خاک طی سه سال

درصد تغییر	مقدار نهایی	مقدار اولیه	شاخص
80	0.81	0.45	کربن آلی خاک (%)
80	1.40	0.78	ماده آلی خاک (%)
111	0.0844	0.040	نیتروژن کل (%)
14.69−	9.60	11.25	نسبت C:N

اثرات باقی‌مانده بر عملکرد گندم

عملکرد دانه گندم در سال دوم نسبت به سال اول 35 درصد افزایش یافت.

جدول 4. مقایسه عملکرد دانه گندم در سامانه‌های کشت آبی

سامانه	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
گندم آبی استان البرز	5068
رقم گندم بهاران (مطالعات قبلی)	6352
گندم بهاران پس از کشت متوالی کود سبز پوشش‌دهنده تابستانه	8130

4. نتایج و بحث

اجرای سامانه کود سبز پوشش‌دهنده تابستانه (SGMCC) در تناوب با گندم آبی موجب بهبود معنی‌دار تولید زیست‌توده گیاهان پوششی، عملکرد دانه گندم و شاخص‌های حاصلخیزی خاک در طول دوره آزمایش شد. بین گونه‌های مختلف گیاهان پوششی از نظر تولید زیست‌توده تفاوت قابل توجهی مشاهده شد. سورگوم–سودان‌گراس بیشترین تولید زیست‌توده خشک را در میان تمامی گونه‌های مورد بررسی داشت و پس از آن ارزن علوفه‌ای، ماش (Vigna radiata) و

گلرنگ قرار گرفتند. در مقابل، ماش (Vigna radiata) و لوبیای چشم‌بلبلی (Vigna unguiculata) زیست‌توده تازه بیشتری تولید کردند که نشان‌دهنده تفاوت‌های گـونه‌ای در توسـعه تاج‌پوشـش و پوشش سریع سطح خاک در شرایط تابستانه است.

عملکـرد دانـه گنـدم به‌طـور معـنی‌داری تحت تـأثیر تیمارهـای گیـاه پوششـی قبلی قـرار گـرفت. بیشـترین عملکـرد گنـدم پس از مـاش (Vigna radiata) ثبت شـد، در حـالی کـه جـو (به‌عنـوان پوشش)، شبدر شیرین (Melilotus officinalis) و کنجد نیز در میان تیمارهای برتـر قـرار گرفتنـد. به‌طور کلی، گیاهان پوششی لگومینه نسبت به گونه‌های غیرلگوم اثرات بهتری بر عملکـرد گنـدم داشتند که احتمالاً ناشی از تثبیت زیستی نیـتروژن و افـزایش دسترسـی عناصـر غـذایی در خـاک است.

شاخص‌های حاصلخیزی خاک در طول سه سال اجرای سامانه SGMCC بهبود قابل توجهی نشـان دادند. کربن آلی خاک (SOC) از 0.45 درصد به 0.81 درصد افزایش یافت که معـادل 80 درصـد افزایش است. ماده آلی خاک (SOM) نیز از 0.78 درصد به 1.40 درصـد رسـید کـه نشـان‌دهنده افزایش 80 درصدی است. نیتروژن کل خاک از 0.040 درصد به 0.0844 درصد افـزایش یـافت که معادل حدود 111 درصد رشد است. در مقابل، نسبت کربن بـه نیـتروژن (C:N) از 11.25 بـه 9.60 کاهش یافت (14.7 درصد کاهش)، که نشان‌دهنده بهبود چرخـه عناصـر غـذایی و افـزایش سرعت معدنی‌شدن مواد آلی در خاک است.

در خصوص اثرات باقی‌مانده بر عملکرد گندم، عملکرد دانه در سال دوم نسبت به سـال اول 35 درصد افزایش یافت که بیـانگر بهبـود تـدریجی عملکـرد سـامانه در طـول زمـان اسـت. همچـنین مقایسه با شاخص‌های منطقه‌ای نشان داد که سامانه گیاه پوششی عملکـردی بـالاتر از میـانگین گندم آبی استان (5068 کیلوگرم در هکتار) و همچنین بـالاتر از مقـادیر گزارش‌شـده قبلی بـرای رقم «بهاران» تحت مدیریت متداول (6352 کیلوگرم در هکتار) داشت، در حالی کـه در شـرایط بهینه تا 8130 کیلوگرم در هکتار نیز رسید.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سـامانه کـود سـبز پوشـش‌دهنده تابسـتانه به‌طـور معـنی‌داری مـوجب بهبـود حاصـلخیزی خـاک و افـزایش پایـدار عملکـرد گنـدم در سـامانه‌های آبی منـاطق نیمه‌خشک می‌شود. تفاوت‌های مشاهده‌شده میان گونه‌ها نیز اهمیت انتخاب صحیح گیاه پوششی را برجسته می‌کند؛ به‌طوری‌که لگوم‌ها بیشترین پتانسـیل را بـرای بهبـود همزمـان کیفیت خـاک و عملکرد گندم نشان دادند.

نتایج این مطالعه با بخش قابل توجهی از منابع علمی همخوانی دارد که بر نقش گیاهان پوششی در بهبود عملکرد سامانه های اکولوژیکی زراعی از طریق فرآیندهای متقابل خاک–گیاه تأکید دارد (Blanco-Canqui et al., 2015; Poeplau & Don, 2015). افزایش قابل توجه کربن آلی خاک، ماده آلی و نیتروژن کل نشان می‌دهد که کاربرد مکـرر زیسـت‌توده گیاهـان پوششـی می‌توانـد تعـادل مواد غذایی خاک را به سمت وضعیت مطلوب‌تر تغیـیر دهـد. افـزایش 80 درصـدی SOC و SOM طی سه سال نشان می‌دهد که حتی در سامانه‌های نیمه‌خشک آبی، امکان افزایش سریع ورودی کربن به خاک وجود دارد. این یافته با نتایج Lal (2015, 2020) هم‌راستا است که احیای ماده آلی خاک را برای پایداری سامانه‌های کشاورزی ضروری می‌داند.

افـزایش قابـل توجـه نیـتروژن کـل خـاک (111 درصـد) اهمیت نقش لگوم‌هـا در تثـبیت زیسـتی نیتروژن را برجسته می‌کند و احتمالاً دلیل اصلی برتری مـاش در افـزایش عملکـرد گنـدم اسـت.

این نتایج با یافته‌های Finney و Kaye (2017) همخوانی دارد که نشان داده‌اند سامانه‌های مبتنی بر لگوم می‌توانند بخشی از نیاز کود نیتروژنه را جایگزین کنند.

کاهش نسبت C:N نیز نشان‌دهنده افزایش فعالیت میکروبی و بهبود چرخه عناصر غـذایی اسـت. نسبت‌های پایین‌تر C:N معمولاً با تجزیه سریع‌تر مواد آلی و آزادسازی بیشتر عناصر غذایی همراه هستند، موضوعی که با نتایج Bowles et al. (2020) درباره نقش تنوع کشت در افزایش فعالیت زیستی خاک هم‌راستا است.

افزایش 35 درصدی عملکرد گنـدم در سـال دوم بیـانگر اثـرات تجمعی مثبت سـامانه اسـت کـه احتمالاً ناشی از بهبود تدریجی ساختار خاک، افزایش مواد غذایی و فعالیت زیستی می‌باشـد. این روند افزایشی با نتـایج مطالعـات فـراتحلیلی نـیز همخـوانی دارد کـه معمـولاً افـزایش 10 تـا 30 درصدی عملکرد را گزارش کرده‌اند (Abdalla et al., 2019; Garba et al., 2022).

برتری لگوم‌ها نسبت به سایر گونه‌ها ناشی از تثبیت نیتروژن، کیفیت بالاتر بقایا و تحریک فعالیت میکروبی در ریزوسفر است، در حالی که گونه‌های غیرلگوم با وجـود تولیـد زیسـت‌توده بـالا، اثـر محدودتری بر تأمین سریع نیتروژن دارند. این تعادل میـان تولیـد کـربن و تـأمین نیـتروژن توسـط Blanco-Canqui et al. (2015) نیز گزارش شده است.

در نهایت، نتایج اهمیت ادغام گیاهان پوششی با خـاک‌ورزی حـداقلی را نـیز نشـان می‌دهـد، زیـرا کاهش اختلال خاک به تثبیت بهتر ماده آلی و کاهش تلفات کـربن کمـک می‌کنـد. Lal (2020) نـیز تأکید کرده است که بیشترین پایداری در ترسیب کربن زمانی حاصل می‌شود که ورودی‌هـای آلی با حداقل دستکاری خاک همراه باشند.

در مجموع، یافته‌های این پـژوهش نشـان می‌دهـد کـه کودهـای سـبز پوشـش‌دهنده تابسـتانه یـک راهبرد مؤثر برای بهبود سلامت خاک، افزایش کارایی چرخـه عناصـر غـذایی و ارتقـای بهـره‌وری گندم در سامانه‌های آبی مناطق نیمه‌خشک هسـتند. این نتـایج همچـنین بـه توسـعه دانش محـدود موجود درباره سامانه‌های پوششی فصل گرم کمک می‌کنـد و پیامـدهای کـاربردی بـرای مـدیریت پایدار تولید گندم ارائه می‌دهد.

---

5. نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که ادغام کود سـبز پوشـش‌دهنده تابسـتانه (SGMCC) در تناوب‌هـای گنـدم آبی می‌تواند به‌طور قابل توجهی کیفیت خاک و عملکرد گندم را در شرایط نیمه‌خشک بهبود دهد. طی سه سال اجرای مداوم، شاخص‌های کلیدی حاصلخیزی خـاک شـامل کـربن آلی، مـاده آلی و نیتروژن کل بهبود چشـمگیری نشـان دادنـد. افـزایش 80 درصـدی SOC و SOM و افـزایش 111 درصدی نیتروژن کل خاک نشان‌دهنده ارتقـای قابـل توجـه وضـعیت تغـذیه‌ای و ظـرفیت ترسـیب کربن خاک است. کاهش نسبت C:N نیز بیانگر بهبود چرخه مواد غذایی و افزایش فعالیت زیستی خاک می‌باشد. عملکرد گندم نیز به‌طـور مثبت تحت تـأثیر قـرار گـرفت و 35 درصـد افـزایش در طول دوره مشاهده شد. در میان گونه‌ها، لگوم‌هـا به‌ویـژه مـاش (Vigna radiata) بیشـترین اثـر مثبت را بر عملکرد گندم داشتند که احتمالاً ناشی از تثبیت نیتروژن و کیفیت بهتر بقایا اسـت. در مقابل، گونه‌های غیرلگوم با زیست‌توده بالا بیشتر مـوجب افـزایش ورودی کـربن شـدند امـا اثـر محدودتری بر بهبود سریع عملکرد گنـدم داشـتند. این موضـوع اهمیت انتخـاب گونـه مناسـب بـر

اساس هدف سامانه را نشان می‌دهد. در مجموع، نتایج تأیید می‌کند که سامانه کود سبز تابستانه یک راهبرد مؤثر برای افزایش پایداری تولید گندم، بهبود حاصلخیزی خاک و تقویت چرخه کـربن و نیتروژن در سامانه های اکولوژیکی کشاورزی نیمه‌خشک آبی است. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر پایداری بلندمدت سامانه، بهینه‌سازی مخلوط گونه‌ها و تعامـل این سـامانه بـا خـاک‌ورزی حداقلی و مدیریت آبیاری تمرکز داشته باشند تا توصیه‌های دقیق‌تری برای منـاطق مختلـف ارائـه شود.

6. سپاسگزاری

نویسنده مراتب قـدردانی خـود را از سـازمان تحقیقـات، آمـوزش و تـرویج کشـاورزی (AREEO) ایران به دلیل حمایت‌های نهادی و فراهم‌سازی امکانات لازم برای اجـرای آزمایش‌هـای بلندمـدت مزرعه‌ای ابراز می‌دارد. همچنین از کارکنان فنی و نیروهای اجرایی مزرعه که در ایجاد، نگهداری و جمع‌آوری داده‌هــای این آزمایش‌هــا در طــول دوره پــژوهش مشــارکت داشــتند، صــمیمانه سپاسگزاری می‌شود. در نهایت، نویسنده از همکاران و پژوهشگران مؤسسه تحقیقـات اصـلاح و تهیه نهـال و بـذر (SPII) در کـرج بـه دلیـل همکاری‌هـای ارزشـمند در مراحـل مختلـف انجـام این پژوهش قدردانی ویژه دارد. از تمامی پژوهشگران و کارشناسان آزمایشگاهی مؤسسه تحقیقات خاک و آب که در انجام آنالیزهای خاک مشارکت داشتند نیز صمیمانه تشکر می‌شود.

7. منابع مورد بررسی

Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., Truu, J., Rees, R. M., & Smith, P. (2019). A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology, 25*(8), 2530–2543. https://doi.org/10.1111/gcb.14644

Alonso-Ayuso, M., Gabriel, J. L., García-González, I., Del Monte, J. P., & Quemada, M. (2013). Cover crop management and its effect on soil water, nitrogen, and crop productivity in Mediterranean irrigated systems. *[Journal details to be completed]*.

Aslani, F., Mehrvar, M. R., & Juraimi, A. S. (2012). Evaluation of some morphological traits associated with wheat yield under terminal drought stress. *African Journal of Agricultural Research, 7*(28), 4104–4109.

Basche, A. D., Kaspar, T. C., Archontoulis, S., Jaynes, D. B., Parkin, T. B., Miguez, F. E., & Castellano, M. J. (2016). Soil water improvements with the adoption of cover crops in the U.S. Corn Belt. *Journal of Soil and Water Conservation, 71*(6), 523–533.

Bhattacharyya, R., Prakash, V., Kundu, S., & Gupta, H. S. (2008). Effect of tillage and crop rotations on soil physical properties and crop productivity under a soybean–wheat cropping system. *Soil and Tillage Research, 101*(1–2), 88–97.

Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., et al. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in agroecosystems. *Agronomy Journal, 107*(6), 2449–2474. https://doi.org/10.2134/agronj15.0086

Bowles, T. M., Jackson, L. E., Loeher, M., & Cavagnaro, T. R. (2020). Ecological mechanisms underlying soil microbial responses to agricultural management and implications for agroecosystem resilience. *Frontiers in Microbiology, 11*, 1–15.

Chapagain, T., Lee, E. A., & Raizada, M. N. (2020). The potential of multi-species mixtures to diversify cover crop benefits. *Sustainability, 12*(5), 2058. https://doi.org/10.3390/su12052058

Chahal, I., Vyn, R. J., Mayers, D., & Van Eerd, L. L. (2020). Cumulative impact of cover crops on soil carbon sequestration and profitability in a temperate humid climate. *Scientific Reports, 10*, 13381. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70224-6

Chu, M., Jagadamma, S., Walker, F. R., Eash, N. S., Buschermohle, M. J., & Duncan, L. A. (2017). Effect of multispecies cover crop mixture on soil properties and crop yield. *Agricultural & Environmental Letters, 2*(1), 170030. https://doi.org/10.2134/ael2017.09.0030

Del Río, M., et al. (2016). Residue management and carbon sequestration in coarse-textured soils of semi-arid regions. *[Journal details to be completed]*.

Finney, D. M., & Kaye, J. P. (2017). Functional diversity in cover crop mixtures increases multifunctionality in agroecosystems. *Journal of Applied Ecology, 54*(2), 509–517. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12765

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *State of the world's land and water resources for food and agriculture*. FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Global soil health assessment*. FAO.

Garba, I. I., Bell, L. W., & Williams, A. (2022). Cover crop legacy impacts on soil water and nitrogen dynamics, and on subsequent crop yields in drylands: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development, 42*, 34. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00760-0

Gregorich, E. G., Greer, K. J., Anderson, D. W., & Liang, B. C. (1998). Carbon distribution and losses: Erosion and deposition effects. *Soil and Tillage Research, 47*, 291–302.

Hossain, M. M., Sarker, M. A. Z., Haque, M. M., & Bell, R. W. (2019). Cover crops for sustainable soil health and nematode management: A review. *[Journal details to be completed]*.

Hussain, M. I., Danish, S., Sánchez-Moreiras, A. M., & Reigosa, M. J. (2018). Allelopathic effects of cover crops on weeds and crop productivity: A review. *[Journal details to be completed]*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change and land*. IPCC.

Jafari, A., et al. (2019). Water productivity improvements in wheat-based systems. *[Journal details to be completed]*.

Kamara, A. Y., Menkir, A., Badu-Apraku, B., & Ibikunle, O. (2007). The influence of legume cover crops on soil fertility and cereal productivity in sub-Saharan Africa. *[Journal details to be completed]*.

Khan, M. A., Marwat, K. B., Hassan, G., & Khan, N. (2019). Cover crops suppress weeds and improve wheat productivity under conservation agriculture. *[Journal details to be completed]*.

Kim, N., Zabaloy, M. C., Guan, K., & Villamil, M. B. (2020). Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research. *Soil Biology and Biochemistry, 142*, 107701. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107701

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability, 7*(5), 5875–5895. https://doi.org/10.3390/su7055875

Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Journal of Soil and Water Conservation, 75*(5), 123A–127A.

Lal, R., Negassa, W., & Lorenz, K. (2020). Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability, 15*, 79–86.

Malakouti, M. J. (2018). *Sustainable agriculture and soil fertility in Iran*. Tehran University Press.

Mazzoncini, M., Sapkota, T. B., Barberi, P., Antichi, D., & Risaliti, R. (2011). Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content. *Soil and Tillage Research, 114*(2), 165–174.

Mehrvar, M. R., & Asadi, H. (2006). Agronomical and economical assessment of planting methods and seeding rates in irrigated wheat (Triticum aestivum L.). *Journal of Agronomy, 5*(4), 626–633. https://doi.org/10.3923/ja.2006.626.633

Mohler, C. L. (2001). Enhancing the competitive ability of crops. In M. Liebman, C. L. Mohler, & C. P. Staver (Eds.), *Ecological management of agricultural weeds* (pp. 269–321). Cambridge University Press.

Navarro-Pedreño, J. (2021). Soil organic matter management and carbon sequestration under climate change scenarios. In *Soil management and climate change*.

Nkongolo, N. V., & Knight, J. D. (2006). Effects of cover crops on nutrient cycling and soil fertility in cereal production systems. *[Journal details to be completed]*.

Oldfield, E. E., Bradford, M. A., & Wood, S. A. (2019). Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil, 5*, 15–32.

Oldfield, E. E., Bradford, M. A., & Wood, S. A. (2022). Soil biodiversity and ecosystem functioning in agroecosystems. *Global Change Biology, 28*(3), 1–18.

Parihar, C. M., Jat, S. L., Singh, A. K., Majumdar, K., Jat, M. L., Saharawat, Y. S., Pradhan, S., & Kuri, B. R. (2017). Bio-energy, water-use efficiency and economics of maize–wheat–mungbean system under precision-conservation agriculture in semi-arid agro-ecosystem. *Energy, 119*, 245–256. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.068

Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cover crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 200*, 33–41.

Sainju, U. M., Singh, B. P., & Whitehead, W. F. (2002). Long-term effects of cover crops on soil carbon, nitrogen, and crop yields. *Agronomy Journal, 94*, 498–508.

Tilman, D., Reich, P. B., & Knops, J. M. H. (2007). Biodiversity and ecosystem stability in grasslands. *[Verify exact publication details]*.

Yu, X., et al. (2024). Plant-derived organic fertilizers enhance soil microbial stability and reduce ecological risks: A global meta-analysis. *[Journal details to be completed]*.

Effects of summer green manure cover crops on increasing soil organic carbon, soil fertility, and wheat productivity in an irrigated wheat-based cropping system

[1.] Mohammad Reza Mehrvar, [2.] Ali Ghorbani

[1].Retired scientific board member [2.] Cereal researcher, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Karaj, Iran
Corresponding author: mehrvarmr@gmail.com

Abstract

Declining soil organic matter and increasing reliance on chemical fertilizers threaten the long-term sustainability of irrigated wheat production in semi-arid regions. Summer green manure cover crops (SGMCCs) have emerged as a promising conservation agriculture strategy for restoring soil health, enhancing carbon sequestration, and improving crop productivity. This study evaluated the long-term effects of summer green manure cover crops on wheat grain yield, soil organic carbon (SOC), soil organic matter (SOM), total soil nitrogen (TN), and overall soil fertility in an irrigated wheat-based cropping system. A four-year field experiment was conducted under semi-arid conditions in Karaj, Iran. Sixteen summer cover crop species were established following a short weed-fallow period and incorporated into the soil 2–3 weeks before wheat planting. The experiment was arranged in a randomized complete block design with three replications. Wheat grain yield, biomass production, harvest index, soil organic carbon, soil organic matter, total nitrogen, and the C:N ratio were measured annually. Data were analyzed using analysis of variance, and treatment means were compared using Duncan’s Multiple Range Test or LSD at $P \leq 0.05$. After three consecutive years of implementation, soil organic carbon increased by approximately 80%, soil organic matter increased by 80%, and total soil nitrogen increased by 111%. Wheat grain yield increased by 35% in the second year compared with the first year, indicating a strong residual effect of summer green manure cover crops. Among the evaluated species, mung bean (Vigna radiata), cowpea (Vigna unguiculata), and hairy vetch (Vicia villosa) consistently produced the greatest improvements in both soil fertility and wheat productivity. Integrating summer green manure cover crops with reduced tillage substantially improved soil fertility, enhanced carbon sequestration, and increased wheat productivity under irrigated semi-arid conditions. The cumulative legacy effects observed over multiple growing seasons indicate that this management strategy provides a practical pathway toward sustainable wheat production while reducing dependence on synthetic fertilizers and improving long-term soil health.

Keywords: conservation agriculture; cover crops; green manure; irrigated wheat; soil fertility; soil organic carbon; sustainable cropping systems